

**Ю.Н. ВЕПРИК**, д-р. техн. наук, НТУ «ХПИ», Харьков,  
**С.Н. ЛЕБЕДКА**, Сумской государственный университет, Сумы

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ СРЕДСТВ КОМПЕНСАЦИИ ЕМКОСТНЫХ ТОКОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ 6-10 кВ**

У роботі представлені результати досліджень електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах 6-10 кВ з різними режимами нейтралі і ефективності вживаних засобів обмеження ємкісних струмів і перенапружень при однофазних замиканнях на землю.

В работе представлены результаты исследований электромагнитных переходных процессов в электрических сетях 6-10 кВ с различными режимами нейтрали и эффективности применяемых средств ограничения емкостных токов и перенапряжений при однофазных замыканиях на землю.

The results of researches of electromagnetic transients are in-process presented in electric networks 6-10 kV with the different modes of neutral and efficiency of the applied facilities of limitation of capacity currents and overstrains at monophase ground-faults.

**Постановка проблемы.** В Украине сети 6–10 кВ работают либо с изолированной нейтралью, либо с компенсацией емкостного тока замыкания на землю. Причем работают в условиях, когда какие-либо средства ограничения токов и напряжений при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) практически отсутствуют, поэтому высокая аварийность характерна как для тех, так и для других сетей. Отрицательные последствия ОЗЗ в электрических сетях с изолированной нейтралью тем значительнее, чем протяженнее сеть и, соответственно, чем больше значения емкостных токов, протекающих по сети и в месте повреждения. Поэтому одним из средств предотвращения или хотя бы снижения этих последствий является компенсация емкостных токов замыкания. Индуктивность, обеспечивающая компенсацию, включается в нейтраль дополнительного трансформатора, и при настройке индуктивного сопротивления реактора в резонанс с емкостным сопротивлением сети обеспечивается компенсация емкостных токов. Однако эффект от практической реализации этого на первый взгляд простого решения проблемы оказывается, как свидетельствуют публикации, далеко не всегда положительным.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Вопросы о том, какие средства ограничения токов ОЗЗ и перенапряжений использовать, как выбирать их параметры и др. активно обсуждаются, но предлагаемые их решения во многих из опубликованных работ основаны, как правило, на результатах исследований протекающих переходных процессов по упрощенным эквивалентным схемам замещения сетей, применение которых приводит к тому, что результаты теоретических исследований, выполненных разными авторами и организациями, противоречивы.

Опыт же практического использования предлагаемых средств показывает, что в зависимости от конкретных условий реализации эффект от применения каждого из них оказывается либо положительным, либо отрицатель-

ным. [1,2] Такую ситуацию следует рассматривать как свидетельство того, что принципиальная возможность применения соответствующих средств имеется (при наличии положительных результатов), но необходима работа по выявлению и уточнению условий, при которых применение того или иного способа может дать положительный эффект.

А отрицательный опыт применения тех или иных средств можно рассматривать и как результат неправильного их использования, и как свидетельство того, что вопросы выбора средств ограничения и режима нейтрали еще недостаточно изучены. Поэтому сообщения о том, что для настройки ДГР «перепробованы все известные принципы регулирования (амплитудный, фазовый, ШИМ-модуляции, непрямоугольной частоты и др.), однако ни один не дал искомых результатов» [3] можно рассматривать как подтверждение необходимости в разработке более точных и адекватных моделей для поиска эффективных средств ограничения токов и перенапряжений при ОЗЗ в электрических сетях 6–10 кВ.

**Цель, задачи исследования.** Для определения путей повышения эффективности средств ограничения перенапряжений и токов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ необходимо выяснить причины низкой эффективности тех средств, которые применяются. Упрощенными моделями на основе однофазных эквивалентов, не отражающими целый ряд особенностей как самих сетей, так и протекающих в них переходных процессов, эта задача не решается. Базовая модель [4], основанная на представлении элементов сети не однофазными эквивалентами, а трехфазными многополюсниками и уравнениями в фазных координатах, позволяет учитывать реальную конфигурацию сети, параметры элементов сети (активные сопротивления, собственные и взаимные индуктивности и емкости фаз) и параметры ее режима (токи, напряжения, мощности фаз), способ заземления нейтрали и воспроизводить электромагнитные переходные процессы при симметричных и несимметричных повреждениях в электрических сетях произвольной конфигурации. Поэтому с целью выявления факторов, снижающих эффективность применяемых средств ограничения емкостных токов и перенапряжений, исследования режимов работы кабельных сетей 6–10 кВ выполнены с применением этой модели.

**Основной материал исследований.** В сетях с изолированной нейтралью и при их небольшой протяженности (до 10–20 км) ток однофазного замыкания составляет всего несколько ампер, замыкание фазы на землю в одной точке не является аварийным режимом, не требует немедленного отключения, и при емкостных токах до 10–30 А допускается ПУЭ в течение некоторого времени, достаточного для принятия мер по его устранению. Однако по мере развития электрических сетей их протяженность увеличивается и исторически сложившаяся ситуация состоит в том, что с изолированной нейтралью продолжают работать сети с суммарной протяженностью до 80–90 км. Поэтому для выявления условий работы оборудования при ОЗЗ в исследова-

ниях электромагнитных переходных процессов в сетях с изолированной нейтралью принят диапазон длин от 20 до 90 км.

Для определения основных влияющих факторов, степени влияния этих факторов и для оценки возможности повышения эффективности применяемых средств, а также для иллюстрации возможностей разработанных программных средств ниже в качестве расчетных рассмотрены четыре характерных схемы, различающихся суммарной длиной кабельных линий (табл.).

Таблица. Схемы, с различной суммарной длиной кабельных линий

Номер схемы	Суммарная длина, км	Эквивалентное сопротивление, Ом	Ток ОЗЗ, А	Количество узлов
1	21,5	$5,0 - j637,0$	$0 + j15$	21
2	41,6	$8,1 - j220,2$	$3 + j45$	54
3	62,5	$8,8 - j140,1$	$9 + j72$	76
4	85,3	$8,9 - j103,9$	$15 + j96$	93

Суммарные длины кабельных сетей в схемах (от 20 до 90 км) охватывают диапазон изменения протяженности реальных сетей. В каждой из схем кроме основного силового трансформатора имеется дополнительный трансформатор со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ , нейтраль которого может быть изолирована или заземлена через реактор (резонансно-заземленная нейтраль).

Для каждой из схем с учетом ее реальной конфигурации с применением разработанной математической модели выполнены расчеты электромагнитных переходных процессов при ОЗЗ. Моделирование переходных процессов выполнено путем численного интегрирования систем дифференциальных уравнений неявными методами, порядок решаемых систем дифференциальных уравнений равен утроенному количеству трехфазных узлов сети, в процессе численного интегрирования определяются мгновенные значения напряжений и токов (в виде цифrogramм) во всех узлах и ветвях сети, шаг интегрирования  $h = 0,05\text{--}0,1$  мс. В расчетах варьировались: режим нейтрали (изолированная, резонансно заземленная), величины сопротивлений реактора, сопротивление в точке замыкания, удаленность от шин источника питания для исследования влияния этих факторов на токи ОЗЗ, на уровни перенапряжений, эквивалентное сопротивление сети, напряжение смещения нейтрали. Значения сопротивлений реактора в нейтрали изменялись от нуля до бесконечности, чем охватывается весь возможный диапазон режимов нейтрали – глухозаземленная (при  $Z_n = 0$ ), компенсированная (при  $I_3 = 0$ ), изолированная (при  $Z_n = \infty$ ).

По оси абсцисс на цифрограммах (рис. 1-3) откладывается номер шага интегрирования  $h$ , по оси ординат – токи (кА) и напряжения (кВ). Поврежденной принята фаза А.

В сети с изолированной нейтралью токи замыканий на землю в установившихся режимах ОЗЗ зависят от протяженности сети и достигают значений: для некомпенсированной сети протяженностью 23,1 км – 25 А, длиной 41,3 км – 70 А, длиной 60,6 км – 100 А, длиной 81,5 км – 160 А. Протяженность сети и начальная фаза замыканий на землю существенно влияют и на величину начальных импульсов тока в момент замыкания: в зависимости от фазы напряжения в момент возникновения однофазного замыкания начальные импульсы тока с увеличением протяженности сети изменяются от 200А до 1100А.

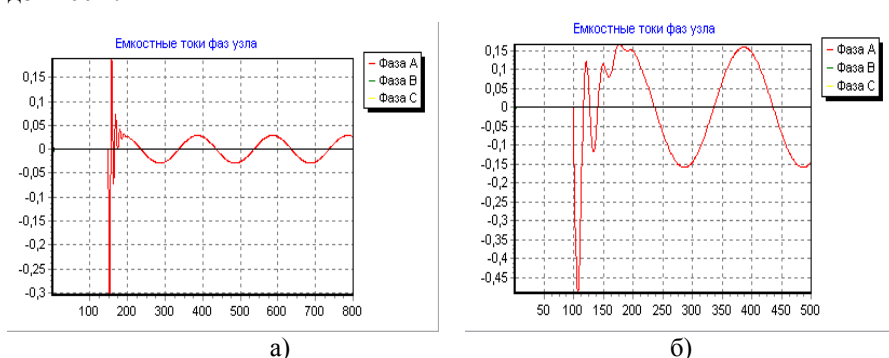


Рис. 1. Токи ОЗЗ в схемах №1 (а), и № 4 (б)

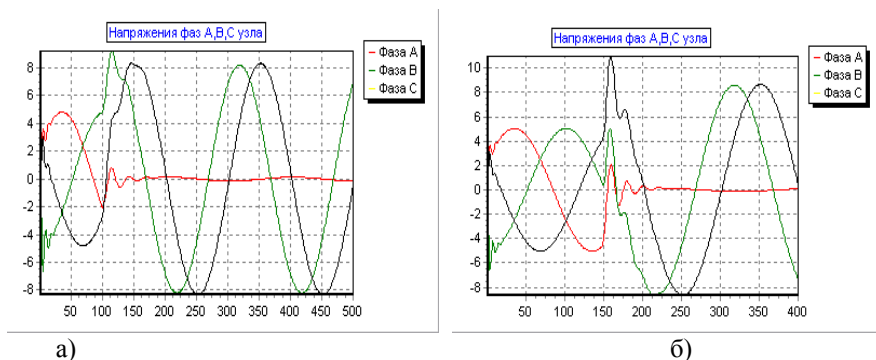


Рис. 2. Перенапряжения на шинах ПС схемы № 3 при ОЗЗ (а) и в схеме № 4 (б)

Перенапряжения в сети (рис. 2) при возникновении замыкания при вариациях степени удаленности точек замыкания, начальных моментов коммутаций, и с увеличением суммарной длины кабельных линий (от 23,1 км до 81,5 км) достигают величины порядка 9–11 кВ (до 2,5  $U_{\phi}$ ). При повторных зажиганиях дуги перенапряжения с каждым новым замыканием сначала увеличи-

ваются, затем, после 3-4 зажиганий стабилизируются. Импульс тока при изменении удаленности от источника питания изменяется от 1,1 кА до 3,2 кА, напряжение фаз после гашения дуги – от 12,1 кВ до 16 кВ (до  $4,6 U_{\phi}$ ).

В схеме № 4 при изолированной нейтрали эквивалентное сопротивление равно 103,9 Ом (табл. 1) и ток ОЗЗ – 100 А (действующее значение). При изменении сопротивления реактора в нейтрали от 0 до 1000 Ом (рис. 3) ток по мере приближения к резонансу снижается и при дальнейшем увеличении  $X_p > 104$  Ом стремится к значению 100 А.

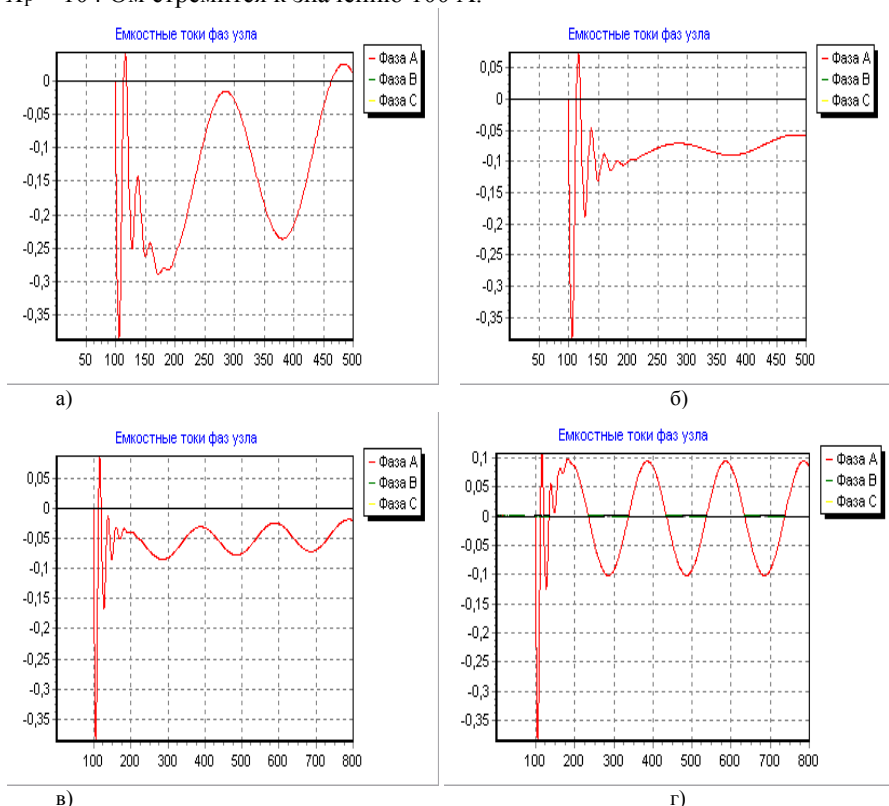


Рис. 3. Переходные процессы в сети № 4 с ДГР: а)  $X_p = 20$  Ом; б)  $X_p = 40$  Ом; в)  $X_p = 60$  Ом; г)  $X_p = 300$  Ом

Представленные цифrogramмы приведены для иллюстрации того, что заземление нейтрали трансформатора через ДГР и его резонансная настройка обеспечивают теоретическую возможность уменьшения емкостного тока через место повреждения и перенапряжений в сети.

Для выяснения причин, по которым эта теоретическая возможность не всегда реализуется в условиях реальной эксплуатации, для каждой из 4 принятых расчетных схем выполнены расчеты режимов ОЗЗ, определены экви-

валентные сопротивления сети, токи в месте замыкания и в нейтрали, напряжения нейтрали при изменении сопротивления ДГР от 0 до 1000 Ом. Результаты расчетов в виде графиков основных зависимостей представлены на рис. 4–5.

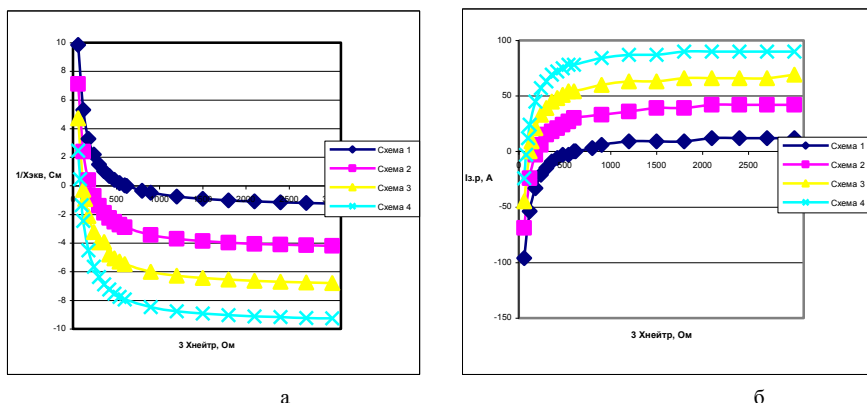


Рис. 4. Зависимость  $1/X_{\text{ЭКВ}}^{(0)}$  (а) и реактивной составляющей тока в месте замыкания (б) от реактивного сопротивления в нейтрали

При включении в нейтраль реактора и увеличении его сопротивления емкостные токи и эквивалентные проводимости по мере увеличения  $X_p$  снижаются до нуля (эквивалентные сопротивления увеличиваются до  $\infty$ ) и при наступлении резонанса при условии  $3\tilde{O}_D = \tilde{O}_{\text{св}}^{(0)}$  меняют знак (рис. 4. а, б).

Ток в нейтрали по мере увеличения  $X_p$  снижается до нуля, напряжение нейтрали (рис. 5) возрастает до фазного, причем при изменении протяженности сети эти зависимости практически не изменяются.

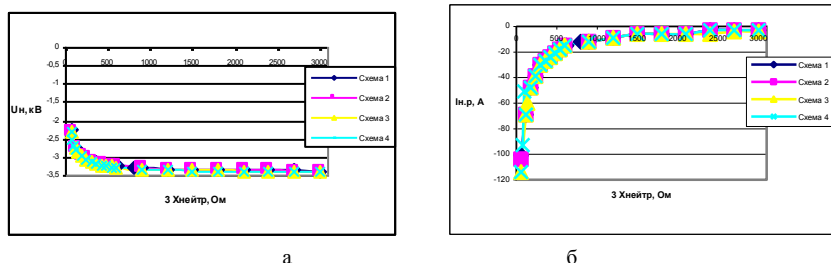


Рис. 5. Зависимость напряжения смещения нейтрали (а) и реактивной составляющей тока в нейтрали (б) от реактивного сопротивления в нейтрали

Представленные результаты, кроме того, что подтверждают еще раз – по полной модели и для схем произвольной конфигурации – возможность обеспечения резонансной настройки, позволяют выяснить факторы, которые снижают эффективность ее практической реализации и являются причиной того, что реализация этого способа нейтрали не дает желаемого эффекта.

Во-первых, следует отметить, что кривые на рис. 5 в окрестности резонансных значений  $X_p$  тем круче, чем более протяженной является сеть (в протяженной сети малые изменения значений  $X_p$  приводят к значительным изменениям эквивалентного сопротивления сети и тока через реактор). Это означает, что требования к точности обеспечения резонанса и, соответственно, к устройствам автоматической настройки ДГР с увеличением суммарной емкости сети также возрастают. Это может служить причиной того, что ДГР и регуляторы, которые в сетях небольшой протяженности еще обеспечивают настройку на резонанс, в протяженных сетях становятся мало эффективными, и для обеспечения резонанса необходимо разрабатывать более совершенные средства.

Во-вторых, важно отметить также и то, что напряжение нейтрали в окрестности резонансных значений  $X_p$  (рис. 6а) отличается от фазного, и отличие напряжения нейтрали от фазного тем значительнее, чем меньше эквивалентное сопротивление сети (опять же – чем протяженнее сеть). Отличие напряжения от фазного не учитывается при определении емкостного тока ОЗЗ методом искусственного смещения нейтрали от дополнительного источника напряжения – **емкостный ток замыкания на землю определяется по формуле**

$$I_{i_{\text{сз}}} = I_{\text{сз}} \frac{U_{\delta}}{U_{\text{ф}}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{изм}}$  – ток, измеренный амперметром;  $U_{\text{ф}}$  – фазное напряжение сети;  $U_{\text{ист}}$  – напряжение источника, поданное в нейтраль заземляющего трансформатора. **Пересчет измеренного тока по формуле (1) в предположении, что напряжение в нейтрали трансформатора в режиме ОЗЗ будет равно фазному напряжению сети,** дает неверный результат, причем погрешность тем выше, чем более протяженной является сеть. При настройке ДГР по току в соответствии с (1) резонанс не может быть обеспечен (а если еще учесть зависимости рис. 6, то тем более). Поэтому представляется, что методики определения емкостных токов и настройки дугогасящих реакторов [5] требуют доработки и уточнения.

В сложившейся ситуации следует считать, что недостатки и аварийность электрических сетей с резонансным заземлением обусловлены, скорее всего, не тем, что неэффективна компенсация емкостных токов как метод улучшения показателей функционирования электрических сетей, а не эффективны средства его технической реализации, и решение проблем нужно искать на пути совершенствования этих средств.

Разработка, изготовление и эксплуатация новых средств требуют значительных затрат. Однако, решая вопрос о том, насколько и какие затраты оправданы, следует иметь в виду, что среди потребителей первой категории имеется достаточно большое число предприятий и технологических процессов (в нефтедобыче, химии, горно-обогатительных производствах,

металлургии, целлюлозно-бумажной промышленности и др.), настолько чувствительных к перерывам электроснабжения, что даже кратковременные перерывы питания (на десятые доли секунды) могут приводить к тяжелым последствиям – нарушению непрерывного технологического процесса, остановке производства, повреждению оборудования, риску для жизни и здоровья людей, угрозе для окружающей среды. В таких ситуациях сети с резонансным заземлением нейтрали дают возможность сохранить нормальную работу на время, необходимое для того, чтобы обеспечить, например, безаварийную остановку технологического процесса. Если исходить из того, что областью применения электрических сетей с резонансно заземленной нейтралью является электроснабжение и таких потребителей, то средства ограничения нужно совершенствовать, и затраты, даже самые дорогостоящие (по сравнению с ущербами от перерывов) экономически оправданы.

### **Выводы.**

1. Необходимость совершенствования резонансного заземления нейтрали и средств настройки на резонанс обусловлена наличием электроприемников, не допускающих даже кратковременных перерывов электроснабжения (по технологическим причинам, по требованиям безопасности).

2. Принятие правильных решений, направленных на повышение эффективности применяемых средств возможно только на пути разработки и применения полных моделей, позволяющих повысить точность исследований при определении свойств и характеристик сетей и выборе параметров оборудования.

**Список литературы:** 1. *Дергилев М.П.* Неснижаемые кратности перенапряжений с сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали / М.П. Дергилев, В.К. Обабков // *Электротехника* – 2010 год. Перспективные виды электротехнического оборудования для передачи и распределения электроэнергии: VIII симпозиум, Моск. обл., 24–26 мая 2005 г.: сб. докл. – М.: ВЕИ, 2005. – Доклад 1.14. 2. *Коновалов Е.Ф.* Работа сетей напряжением 6–35 кВ с различными способами заземления нейтрали / Е.Ф. Коновалов, Н.В. Дроздов, Т.В. Захарова // *Энергетик*. – 2005. – № 4. – С. 40–41. 3. *Миронов И.А.* Проблемы выбора режимов заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ / И.А. Миронов // *Электро*. – 2006. – № 5. – С. 32–36. 4. *Венрик Ю.Н.* Методы моделирования режимов работы электрических систем с несимметрией и тенденции их развития. Вісник Національного технічного університету ‘Харківський політехнічний інститут’. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Енергетика: надійність і енергоефективність. – Харків: НТУ ‘ХПІ’. 2010. № 1 – с. 48–61. 5. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ. – К.: НИИ Энергетики, 1998. – 64 с.

*Поступила в редколлегию 05.11.11*